

Buttes cryogènes saisonnières de plages arctiques, péninsule de Tuktoyaktuk, Territoires du Nord-Ouest

Seasonal Frost Mounds of Arctic Beaches, Tuktoyaktuk Peninsula, Northwest Territories

Saisonbedingte kryogene Hügel an arktischen Stränden, Halbinsel Tuktoyaktuk, Nordwestterritorien

Stéphane Campeau et Arnaud Héquette

Volume 49, numéro 2, 1995

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/033041ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/033041ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Campeau, S. & Héquette, A. (1995). Buttes cryogènes saisonnières de plages arctiques, péninsule de Tuktoyaktuk, Territoires du Nord-Ouest. *Géographie physique et Quaternaire*, 49(2), 265–274. <https://doi.org/10.7202/033041ar>

Résumé de l'article

Des buttes cryogènes saisonnières en système fermé ont été observées de 1991 à 1993 sur les flèches sableuses de la péninsule de Tuktoyaktuk, dans les Territoires du Nord-Ouest. Les buttes ont une forme circulaire et convexe. Leur diamètre varie entre 5 et 15 m et leur hauteur, entre 15 et 25 cm. Le cœur des buttes est constitué d'une lentille de glace intrusive de même diamètre que les buttes. La lentille a une forme convexe et sa base est horizontale. L'épaisseur de la lentille est égale à l'élévation des buttes, soit entre 15 et 25 cm. Les buttes se forment dans une pseudo-dépression située entre la berme de tempête et la berme du rivage de la lagune. À la fin de l'été, les débordements de tempête saturant en eau de mer le sable des flèches. L'engel provoque un accroissement de la pression hydrostatique à l'intérieur de la dépression. Les lentilles de glace intrusive se développent ainsi en système fermé. Les buttes se forment au cours de l'hiver pour disparaître au cours de l'été suivant. La densité des buttes semble être fonction de la fréquence des débordements de tempête inondant les flèches entre la mi-août et la mi-septembre et des conditions d'engel.

BUTTES CRYOGÈNES SAISONNIÈRES DE PLAGES ARCTIQUES, PÉNINSULE DE TUKTOYAKTUK, TERRITOIRES DU NORD-QUEST

Stéphane CAMPEAU et Arnaud HÉQUETTE, Département de géographie et Centre d'études nordiques, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

RÉSUMÉ Des buttes cryogènes saisonnières en système fermé ont été observées de 1991 à 1993 sur les flèches sableuses de la péninsule de Tuktoyaktuk, dans les Territoires du Nord-Ouest. Les buttes ont une forme circulaire et convexe. Leur diamètre varie entre 5 et 15 m et leur hauteur, entre 15 et 25 cm. Le cœur des buttes est constitué d'une lentille de glace intrusive de même diamètre que les buttes. La lentille a une forme convexe et sa base est horizontale. L'épaisseur de la lentille est égale à l'élévation des buttes, soit entre 15 et 25 cm. Les buttes se forment dans une pseudo-dépression située entre la berme de tempête et la berme du rivage de la lagune. À la fin de l'été, les débordements de tempête saturent en eau de mer le sable des flèches. L'engel provoque un accroissement de la pression hydrostatique à l'intérieur de la dépression. Les lentilles de glace intrusive se développent ainsi en système fermé. Les buttes se forment au cours de l'hiver pour disparaître au cours de l'été suivant. La densité des buttes semble être fonction de la fréquence des débordements de tempête inondant les flèches entre la mi-août et la mi-septembre et des conditions d'engel.

ABSTRACT *Seasonal frost mounds of arctic beaches, Tuktoyaktuk Peninsula, Northwest Territories.* Closed-system seasonal frost mounds were observed from 1991 to 1993 on sandy spits and a barrier island of the Tuktoyaktuk Peninsula, in the Northwest Territories. The frost mounds have a circular and convex shape. Their diameter ranges from 5 to 15 m and their height from 15 to 25 cm. The core of the mounds consists of a lense of intrusive ice of similar diameter than that of the mound. The uppermost surface of the ice lense is convex upward while its base is horizontal. The maximum thickness of an ice lense is equal to the maximum elevation of the frost mound, i.e. ranging from 15 to 25 cm. Frost mounds develop in a depression in the backshore zone, located behind the storm berm. At the end of summer, storm surges induce the saturation of the sandy coastal accumulation landforms with sea water. Freeze-up then results in increased hydrostatic pressures of sea water trapped in the backshore depression, leading to the development of closed-system ice lenses. Frost mounds form in a single winter and disappear completely during the following summer. The density of frost mounds at the surface of the coastal accumulation landforms appears to be related to the frequency of storm surges between mid-August and mid-September and to the freeze-up conditions.

ZUSAMMENFASSUNG *Saisonbedingte kryogene Hügel an arktischen Stränden, Halbinsel Tuktoyaktuk, Nordwestterritorien.* Saisonbedingte kryogene Hügel in einem geschlossenen System hat man von 1991 bis 1993 auf den sandigen Haken der Halbinsel Tuktoyaktuk in den Nordwestterritorien beobachtet. Die Hügel haben kreisförmige und konvexe Form. Ihr Durchmesser reicht von 5 bis 15 m und ihre Höhe 15 bis 25 cm. Der Kern der Hügel besteht aus einer Intrusivseislinse vom selben Durchmesser wie die Hügel. Die Linse hat eine konvexe Form und ihre Basis ist horizontal. Die Dicke der Linse entspricht der Höhe der Hügel d.h. zwischen 15 und 25 cm. Die Hügel bilden sich in einer Pseudo-Senke, die sich zwischen der Sturmleiste und der Ufer-Leiste der Lagune befindet. Am Ende des Sommers tranken die Sturmwoogen den Sand der Haken mit Meerwasser. Das Vereisen führt zu einer Erhöhung des hydrostatischen Drucks im Innern der Senke. So entwickeln sich die Intrusivseislinsen im geschlossenen System. Die Hügel bilden sich während des Winters und verschwinden während des folgenden Sommers. Die Dichte der Hügel scheint von der Häufigkeit der Sturmwoogen abzuhängen, welche die Haken zwischen Mitte August und Mitte September überfluten sowie von den Vereisungsbedingungen.

INTRODUCTION

Les buttes cryogènes saisonnières (*seasonal frost mounds*) telles que définies par van Everdingen (1978, 1982) et par Pollard et French (1983, 1984, 1985) sont le résultat de processus d'écoulement hypodermique d'eau. Ces formes se développent en un seul hiver en réponse à un accroissement des énergies potentielles hydrauliques ou hydrostatiques dans des poches non gelées de la couche active pendant un regel hivernal. Les buttes cryogènes sont caractérisées par le soulèvement des couches superficielles du sol et par une courte période de croissance (van Everdingen et Banner, 1979). Des buttes cryogènes saisonnières ont été décrites dans de nombreuses régions arctiques et sub-arctiques (Leffingwell, 1919 ; Muller, 1945 ; Academia Sinica, 1975 ; Froehlich et Slupik 1978 ; Van Everdingen, 1978, 1982 ; Frederking, 1979 ; Van Everdingen et Banner, 1979 ; French et Gilbert, 1982 ; Brown *et al.*, 1983 ; Pollard et French, 1983, 1984, 1985 ; Åkerman, 1987 ; Dijkmans, 1988 ; Pollard, 1988, 1991). Des formes similaires aux buttes de gel saisonnières ont aussi été signalées par Mackay (1975, 1977) sur la péninsule de Tuktoyaktuk, dans les Territoires du Nord-Ouest, par Åkerman et Malmström (1986) et par Malmström (1987) dans le nord de la Suède ainsi que par Niewiarowski et Sinkiewicz (1988) au Spitsberg.

La plupart des buttes cryogènes saisonnières décrites sont des buttes à noyau de glace (*frost blister*) qui résultent d'un engel en système ouvert. L'écoulement de l'eau le long d'une pente provoque le soulèvement de buttes au bas des pentes et la croissance de glace intrusive. Les buttes se situent habituellement près des sources, en marge des tourbières, le long des cours d'eau, des lacs et des marais maritimes. Les buttes cryogènes saisonnières en système fermé semblent plus rares, French (1971) étant le seul à avoir décrit des formes saisonnières dont la genèse s'apparente à celle des pingos en système fermé. La formation de ces buttes serait associée au gel saisonnier de la couche active au milieu de polygones de fentes de gel à centre déprimé.

En milieu côtier, les buttes décrites se situent dans des marais intertidaux et des vasières (Dionne, 1978 ; Fournier *et al.*, 1987 ; Allard *et al.*, 1992) ; peu de buttes ont été observées sur des plages, dans des îles barrières ou sur des flèches sableuses. Seuls Niewiarowski et Sinkiewicz (1988) ont signalé des buttes de gel situées sur des plages anciennes, mais leur formation est plutôt liée à l'écoulement d'eau en périphérie d'une tourbière actuelle qu'aux conditions qui prévalaient dans le milieu côtier d'origine.

Au cours des étés 1991, 1992 et 1993, plusieurs buttes cryogènes saisonnières ont été observées sur des flèches sableuses et dans une île barrière de la péninsule de Tuktoyaktuk. Ces buttes sont décrites et comparées aux formes similaires présentées dans la littérature. Cet article propose une reconstitution du cycle annuel de formation des buttes cryogènes saisonnières de plages arctiques, élaborée à partir de levés topographiques, de mesures de

la profondeur du mollisol, d'analyses cristallographiques d'échantillons de glace et de données météorologiques.

TERRITOIRE À L'ÉTUDE

La péninsule de Tuktoyaktuk est située dans la zone de pergélisol continu (Heginbottom, 1984). La température moyenne annuelle est de -10°C à Tuktoyaktuk. La banquise côtière persiste en moyenne neuf mois par année. Elle disparaît généralement entre juin et la mi-juillet (Fissel et Birch, 1984). La présence de glace à proximité de la côte au début de l'été limite l'énergie des vagues. À la mi-août, la banquise est suffisamment éloignée de la côte pour permettre la formation de vagues de plus de 2 m lors des tempêtes générées par les vents d'ouest ou du nord-ouest (Harper et Penland, 1982). Le fetch est alors suffisant pour provoquer des crues de tempête qui peuvent élever le niveau de l'eau à plus de 2,4 m au-dessus du niveau moyen de la mer (Harper *et al.*, 1988) et inonder la plupart des îles barrières et des flèches sableuses de la région (Forbes et Frobel, 1985). Les débordements de tempête représentent le mécanisme principal entraînant le recul de la ligne de rivage à un taux moyen de plus de 2 m a^{-1} (Héquette et Ruz, 1991). L'englacement débute généralement en octobre, provoquant localement des empilements de glace dans la zone côtière (Reimnitz *et al.*, 1990).

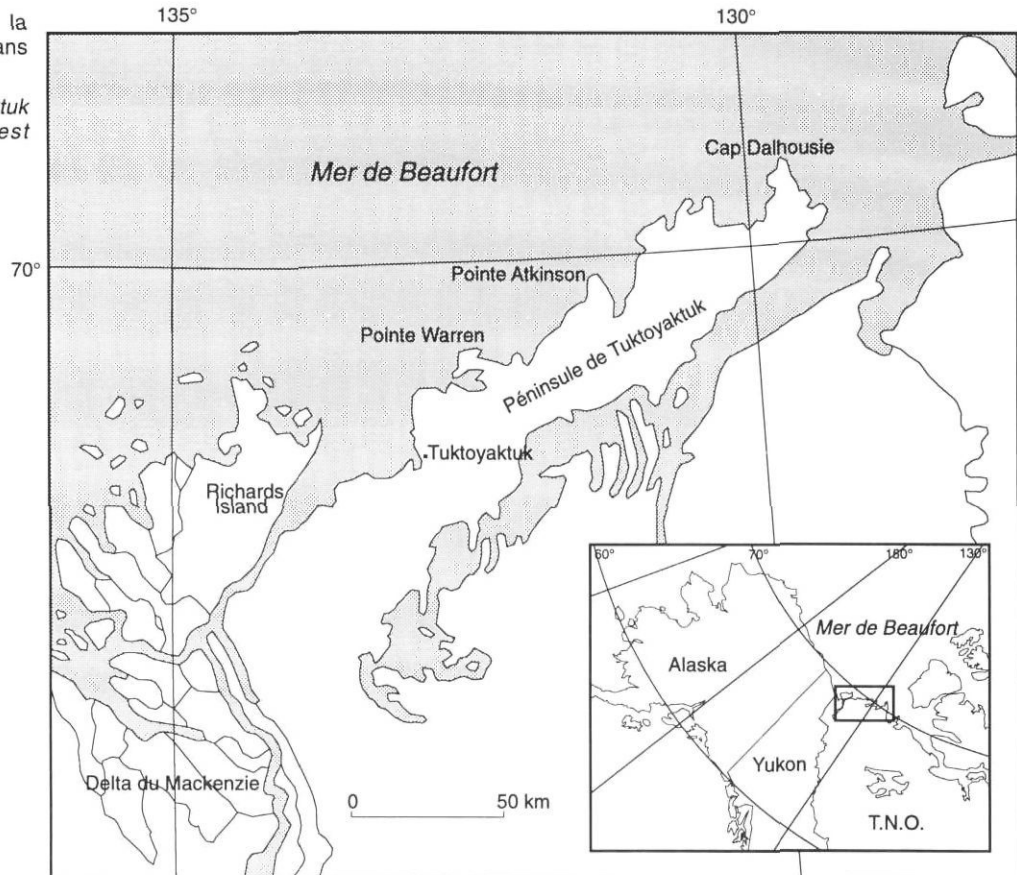
Les buttes cryogènes ont été observées dans des formes d'accumulation littorale situées près des pointes Warren et Atkinson, sur la péninsule de Tuktoyaktuk (fig. 1). Ces deux sites présentent plusieurs caractéristiques géomorphologiques similaires : ils forment des promontoires sableux consistant en un massif dunaire peu élevé ($<5\text{ m}$). L'érosion de ceux-ci fournit des sédiments à deux flèches qui se sont développées de part et d'autre du promontoire (fig. 2). Ces flèches ont donné naissance à des îles barrières qui se sont détachées de la pointe et qui ont migré le long de la côte sous l'action de la dérive littorale (Ruz *et al.*, 1992). Les flèches et les îles barrières sont constituées de sables fins à moyens bien triés. Elles sont peu élevées, leur crête ne dépassant pas 1 m au-dessus du niveau moyen de la mer (fig. 2). Leur largeur est variable, comprise entre 100 et 400 m, mais les flèches sont plus larges et plus longues au nord-est qu'au sud-ouest. Cette dissymétrie serait due au fait que la dérive littorale majeure est orientée vers le nord-est le long de la péninsule de Tuktoyaktuk (Forbes et Frobel, 1985).

RÉPARTITION ET MORPHOLOGIE DES BUTTES CRYOGÈNES

Les buttes n'ont été observées que sur les flèches et dans les îles barrières dont la largeur excède 250 m et où les pentes sont inférieures à 0,5 %. Les buttes se forment au centre des flèches et des îles barrières, sur une surface sub-horizontale bordée par la berme de tempête, du côté de la mer, et par la berme du rivage de la lagune. Cette étendue forme ainsi une pseudo-dépression (fig. 2). Des mesures de l'épaisseur du mollisol à la fin du mois d'août ont montré qu'une dépression sub-superficielle est alors

FIGURE 1. Localisation de la péninsule de Tuktoyaktuk dans les Territoires du Nord-Ouest.

Location map of the Tuktoyaktuk Peninsula in the Northwest Territories.



également présente au sommet du pergélisol (fig. 2). Le pergélisol remonte sous les bermes et redescend au centre de l'île barrière ou de la flèche, en conformité avec la topographie de surface. Aucune butte n'a été observée sur les flèches sableuses et dans les îles barrières étroites où les pentes excèdent 0,5 %.

La densité des buttes cryogènes dans la pseudo-dépression a été évaluée chaque année en comptant le nombre de buttes à l'intérieur de quadrats de 300 m de côté. En 1991 et 1992, la densité des buttes a été estimée à respectivement 22 et 26 par kilomètre carré dans la pseudo-dépression centrale de la flèche située à l'est de la pointe Atkinson. En 1993, cependant, les buttes ne se sont formées qu'à l'extrémité est de la flèche, qui est moins élevée que dans sa partie proximale et la densité n'était alors que de trois buttes par kilomètre carré.

Les données recueillies entre 1991 et 1993 démontrent que les buttes sont des formes saisonnières, aucune butte n'ayant persisté au-delà du mois d'août. Au début de juillet, les buttes ont une forme circulaire dont le diamètre varie entre 5 et 15 m. Elles ont une surface convexe dont le sommet atteint 15 à 25 cm au-dessus de la surface avoisinante du sol, hauteur nettement inférieure à celle des buttes saisonnières à noyau de glace décrites dans la littérature.

Certaines buttes sont partiellement entourées d'un bourlet (fig. 3). Celui-ci semble être le dépôt asséché d'une

coulée de sable qui aurait été entraînée par l'extrusion d'eau sous pression en périphérie de la butte. Cette nappe est recouverte par endroits d'un dépôt de sels. Au cours de l'été, des crevasses apparaissent à la surface des buttes. Celles-ci s'effondrent par la suite graduellement pour s'affaisser complètement à la fin du mois d'août (fig. 4). Les observations effectuées entre 1991 et 1993 démontrent que les buttes ne se reforment pas exactement aux mêmes endroits d'une année à l'autre.

STRUCTURE INTERNE

Le cœur des buttes est constitué d'une lentille de glace circulaire et convexe sensiblement de même diamètre que celui des buttes. La glace se situe entre 35 et 50 cm sous la surface. La base de la lentille est horizontale. L'épaisseur de la glace au centre de la butte est égale à l'élévation de celle-ci, soit entre 15 et 25 cm (fig. 5) ; elle diminue progressivement en périphérie. La lentille se termine avec la butte ; aucune lentille de glace n'a été observée sous les flèches en dehors des limites des buttes cryogènes, bien que le sable gelé comporte de la glace interstitielle.

Le contact entre la lentille de glace et le sable situé au-dessus et en-dessous est abrupt. Au début juillet, le sommet du pergélisol se situe en moyenne à 90 cm sous la surface des flèches. Il remonte cependant en périphérie des buttes pour rejoindre le périmètre externe des lentilles de glace (fig. 6). Il s'abaisse à nouveau de quelques déci-

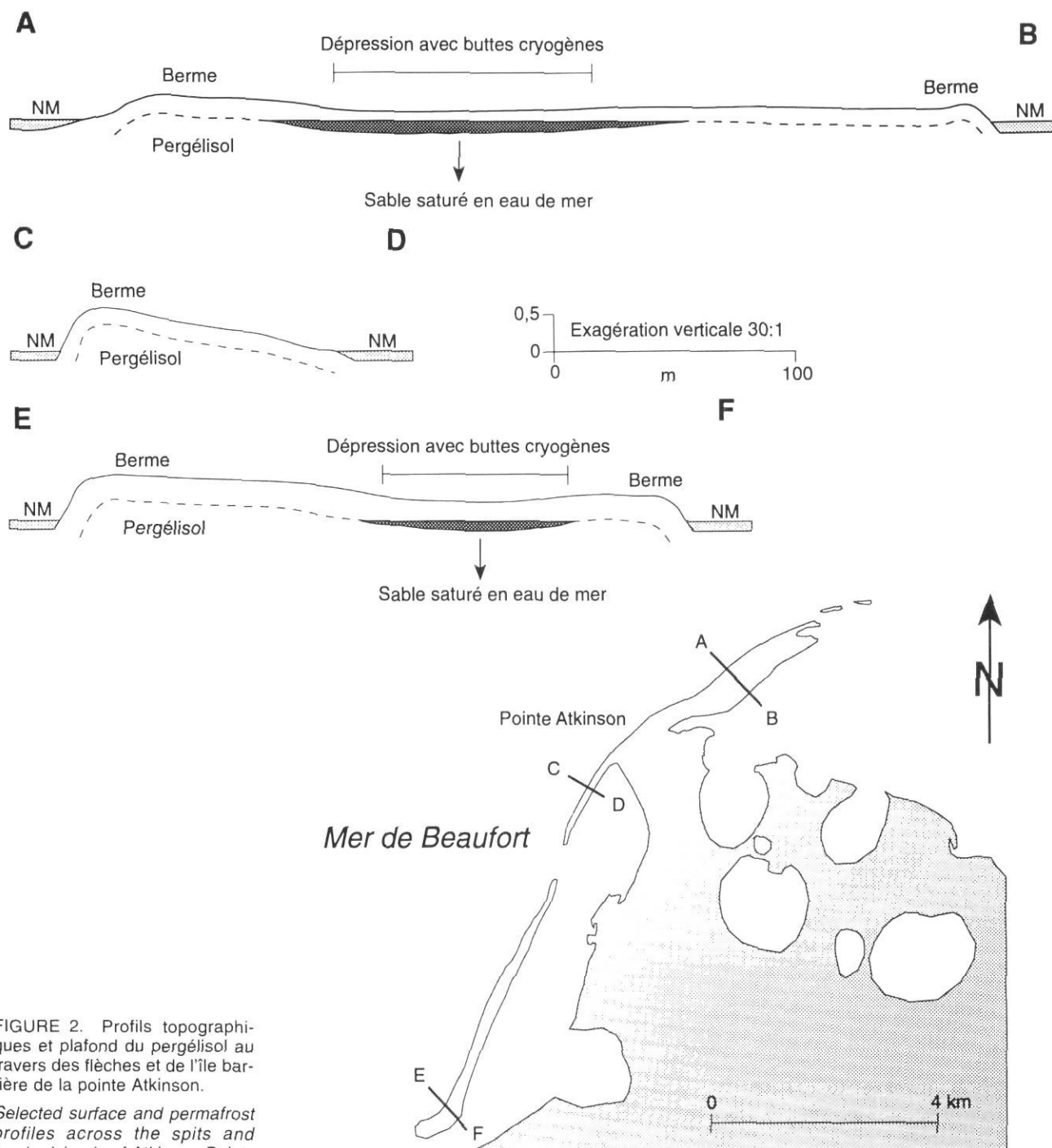


FIGURE 2. Profils topographiques et plafond du pergélisol au travers des flèches et de l'île barrière de la pointe Atkinson.

Selected surface and permafrost profiles across the spits and barrier islands of Atkinson Point.

mètres sous le centre de la butte. Il en résulte la création d'une poche de sable saturé d'eau non gelée emprisonnée sous les buttes cryogènes, au-dessus du sable gelé. La salinité de cette eau au début juillet se situe entre 22 et 31 ‰. La lentille de glace fond progressivement au cours du mois d'août. La périphérie de la lentille étant plus mince, elle fond avant le centre, provoquant l'effondrement de la périphérie de la butte. À la fin août, la lentille de glace a complètement fondu. Le sommet du pergélisol s'est alors abaissé, mais demeure moins profond qu'ailleurs sur la flèche.

CARACTÉRISTIQUES DE LA GLACE

La glace formant la lentille d'une butte cryogène est relativement pure, renfermant de nombreuses inclusions de gaz, mais très peu de sable. Les bandes de bulles de gaz sont réparties parallèlement à la surface de la butte (fig. 7). La glace a une apparence laiteuse là où les concentrations de bulles sont élevées. Les bulles de gaz ont une forme sphérique ou ovale allongées verticalement. L'allongement des bulles est parallèle à la direction de propagation de l'onde de gel, présumément verticale.

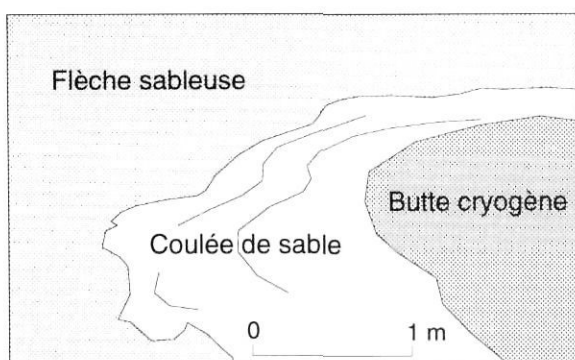


FIGURE 3. Coulée de sable produite par extrusion d'eau sous pression en périphérie d'une butte.

Sand flow, at the edge of a frost mound, due to the extrusion of groundwater induced by increased hydrostatic pressure.

Des lames minces horizontales et verticales d'échantillons de glace illustrent les caractéristiques cristallographiques des lentilles (fig. 8). La glace est composée de gros cristaux colonnaires qui croissent parallèlement à la direction de propagation du gel. Les cristaux, de 1 à 9 mm de diamètre, et de 20 à 70 mm de longueur, sont orientés verticalement. La structure cristallographique de la glace indique que le mécanisme principal de croissance des lentilles est l'injection hypodermique d'eau dans la couche active suivie d'un engel à partir de la surface, comme c'est le cas pour les *frost blisters* (Pollard et French, 1985).

La glace semble être divisée en au moins quatre couches qui pourraient correspondre à différentes périodes de croissance au cours de l'automne et de l'hiver. Cette interprétation est fondée sur l'épaisseur et la disposition des couches. Les trois premières couches sont minces (2-3 cm) et situées près de la surface. Elles pourraient être associées aux différentes phases de gel au cours de l'automne. La couche de base est plus épaisse et pourrait correspondre à l'accroissement de la lentille au cours de l'hiver.

CONDITIONS HYDRAULIQUES ET ENGEL DES PLAGES

Les données morphologiques et cristallographiques semblent indiquer que la formation de la lentille de glace est



FIGURE 4. Effondrement de la périphérie d'une butte cryogène, flèche est de la pointe Atkinson (juillet 1991).

Partial collapse of a frost mound, eastern spit of Atkinson Point (July 1991).

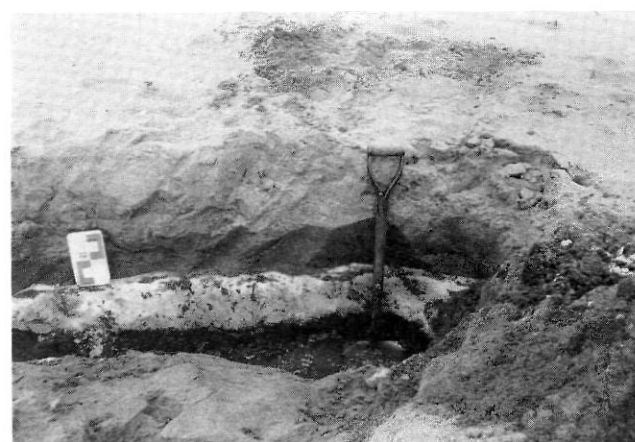


FIGURE 5. Coupe dans une butte cryogène saisonnière montrant une lentille de glace sous une couche sableuse de surface de 40 cm d'épaisseur.

Cross-section in a seasonal frost mound showing an ice lense underlying a surface sand layer 40 cm thick.

associée à une cellule d'eau sous pression. Dans le cas des *frost blisters*, la chambre liquide sous-jacente à la lentille de glace est le résultat de l'injection d'eau provoquée par un écoulement le long d'une pente (Pollard et French, 1985). Dans le cas des flèches sableuses, puisque les pentes sont très faibles et qu'il n'y a pas d'écoulement souterrain, le potentiel hydraulique est faible sinon nul. La salinité de l'eau de la cellule, comprise entre 22 et 31 ‰, démontre que l'eau provient de la mer. La pression hydrostatique élevée responsable de la croissance des lentilles de glace d'injection semble être le résultat de l'engel de la flèche.

L'apport en eau de mer peut provenir de l'infiltration latérale d'eau de mer ou des débordements de tempête. D'après les observations de terrain, il semble que l'infiltration d'eau de mer vers le centre de la flèche soit de moindre importance comparée à l'apport d'eau au moment des débordements de tempête. Les excavations réalisées au dé-

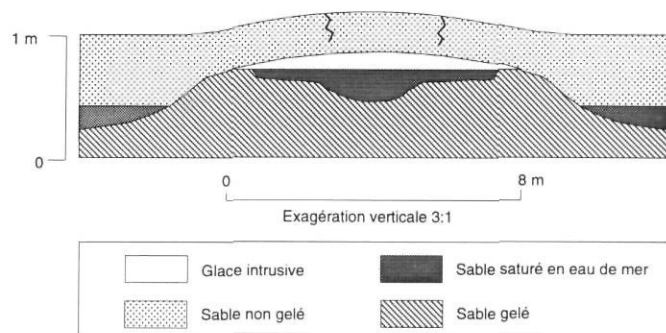


FIGURE 6. Coupe schématique d'une butte cryogène saisonnière au début du mois de juillet. La lentille de glace est parfaitement circulaire et convexe et délimite une cellule sous-jacente de sable non gelé saturé d'eau salé.

Schematic cross-section of a seasonal frost mound in early July. The ice lense is perfectly circular and convexe and overlay a cell of non-frozen seawater-saturated sand.

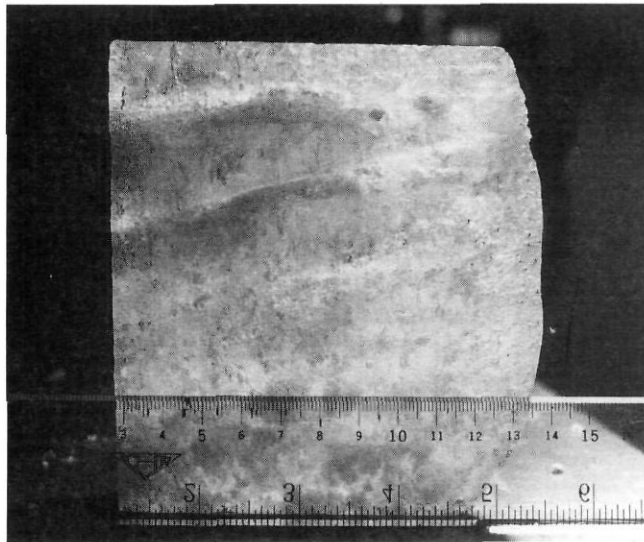


FIGURE 7. Échantillon provenant de la lentille de glace d'une butte cryogène montrant les couches de glace formées lors de phases successives de croissance ainsi que les inclusions de gaz (photographie W.H. Pollard).

Ice sample from the ice lense of a frost mound showing multi-layers growth pattern and gas inclusions (photograph W.H. Pollard).

but juillet ont démontré que le sable au centre de la flèche ne commence à être saturé d'eau qu'à plus de 60 cm de profondeur. À la mi-août, après les premiers débordements de tempête, le sable est complètement saturé d'eau à 10 cm de profondeur. Les premiers débordements de tempête ont généralement lieu au début du mois d'août. D'après les observations de terrain, l'eau de mer inonde les flèches et les îles barrières lorsque des vents supérieurs à 25 km h⁻¹ soufflent du nord-ouest. Au maximum d'une crue, les flèches et les îles sont parcourues d'un flux d'eau continu de 30 cm d'épaisseur en direction de la lagune. Après les premiers débordements, le relief des buttes est aplani. La glace fond graduellement et ne persiste pas au-delà du mois d'août. La fonte de la glace est probablement accélérée par les apports d'eau de mer provenant des débordements de tempête.

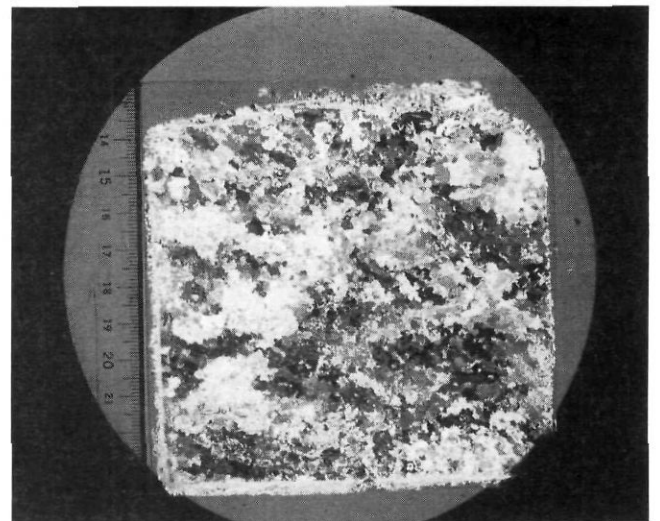
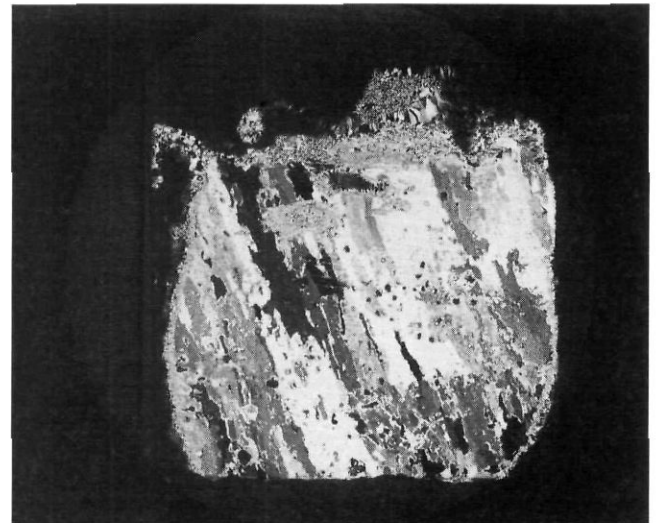


FIGURE 8. Lame mince verticale (en haut) et horizontale (en bas) d'un échantillon de glace provenant de la lentille de glace d'une butte cryogène (photographies W.H. Pollard).

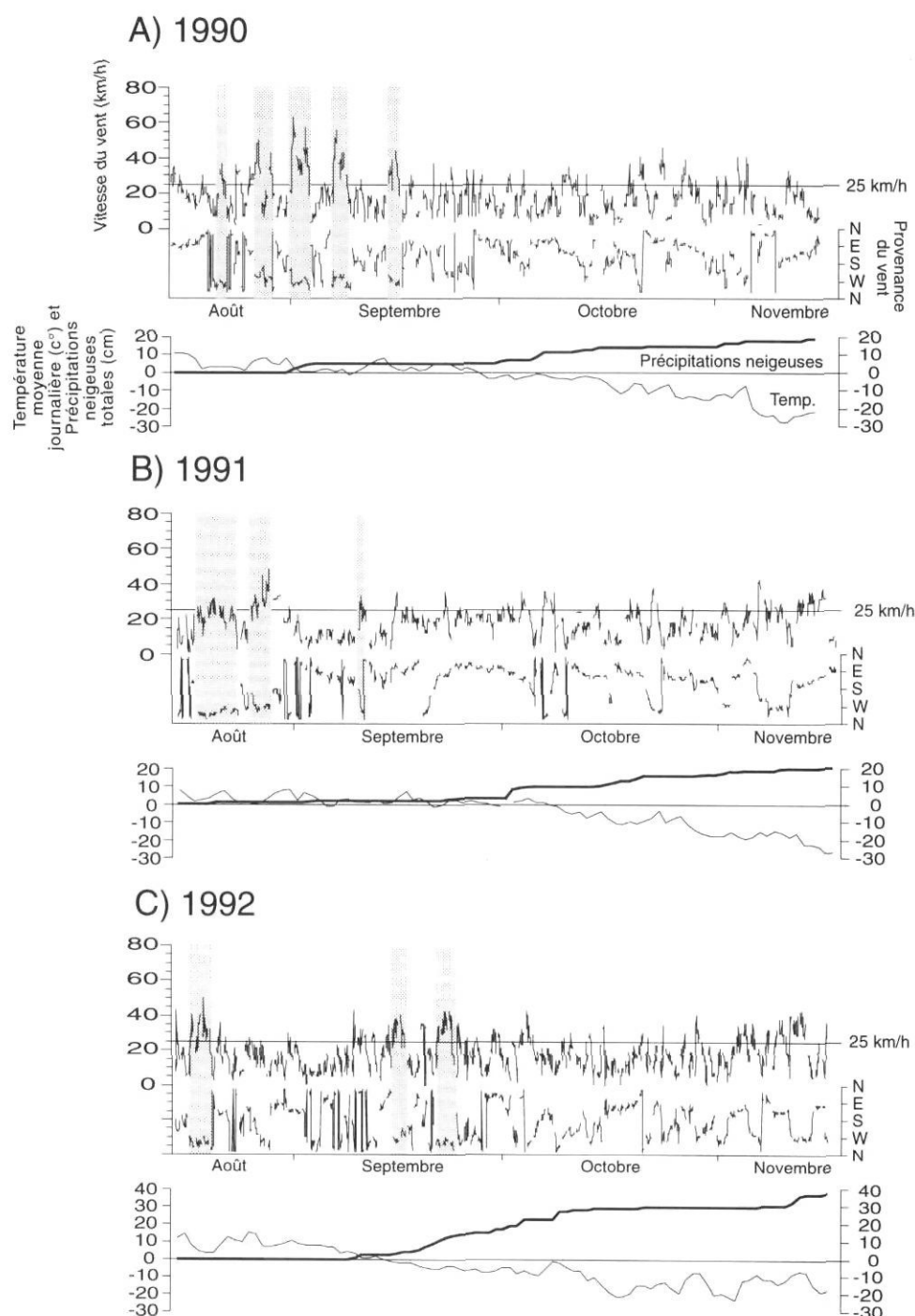
Vertical (top) and horizontal (bottom) thin sections of an ice sample from the ice lense of a frost mound (photograph W.H. Pollard).

L'engel des flèches et des îles débute entre la mi-septembre et le début octobre. D'après Taylor (1980), le front de gel sur les plages arctiques progresse à la fois vers le bas à partir de la surface et vers le haut à partir du pergélisol. Étant donné que le plafond du pergélisol forme une dépression entre les deux bermes, le sable saturé d'eau situé au centre de la flèche se trouve emprisonné par la progression des deux fronts de gel. La pression hydrostatique croissante qui en résulte serait responsable de la formation de glace intrusive et de l'extrusion d'eau salée à l'origine des coulées de sable et des dépôts de sels situés en périphérie des buttes. Les buttes cryogènes des flèches sableuses et des îles barrières se formeraient ainsi en système fermé, à l'instar des buttes décrites par French (1971) et des pingos de la péninsule de Tuktoyaktuk (Mackay, 1973).

Comme il a été mentionné, la densité des buttes cryogènes saisonnières a varié de 1991 à 1993. Il est probable

FIGURE 9. Vitesses et directions du vent, températures journalières moyennes et précipitations neigeuses totales entre le 15 août et le 15 novembre 1990 (A), 1991 (B) et 1992 (C) (station météorologique de Tuktoyaktuk). Les zones ombragées couvrent les périodes où il y a probablement eu un débordement de tempête (vents du nord-ouest supérieurs à 25 km h^{-1}).

Wind speed and direction, mean daily temperature, and total snow fall from August 15 to November 15 in 1990 (A), 1991 (B), and 1992 (C) (Tuktoyaktuk weather station). The shaded areas show periods of potential storm surges resulting in barrier overwashing (northwesterly winds in excess of 25 km h^{-1}).



que la différence de densité soit attribuable à la variabilité des conditions d'engel et des apports en eau de mer à la fin de l'été et au cours de l'automne. D'après les données météorologiques de Tuktoyaktuk (fig. 9A), il semble qu'il y ait eu cinq épisodes ayant pu provoquer des débordements de tempête sur les flèches sableuses de la pointe Atkinson (vents du nord-ouest supérieurs à 25 km h^{-1}) entre la mi-août et la mi-septembre 1990. La température moyenne journalière a commencé à descendre sous zéro et les précipitations neigeuses ont commencé à être plus fréquentes au début octobre. Ces conditions météorologiques ont per-

mis la formation de 22 buttes par kilomètre carré. Des conditions similaires ont prévalu en 1991, avec toutefois moins de débordements au début de septembre (fig. 9B).

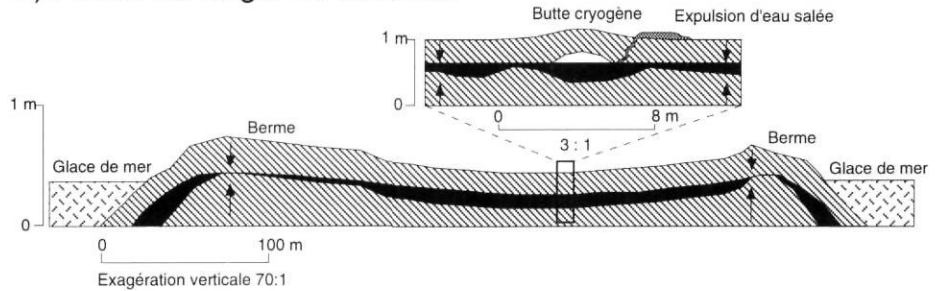
En 1992, il y eut formation de seulement trois buttes par kilomètre carré. Cette faible densité, par rapport à 1990 et 1991, pourrait s'expliquer par les conditions météorologiques particulières ayant prévalu au cours de cet automne (fig. 9C) :

- 1) Le gel et les fortes précipitations neigeuses ont commencé deux semaines plus tôt qu'en 1990 et 1991 ;

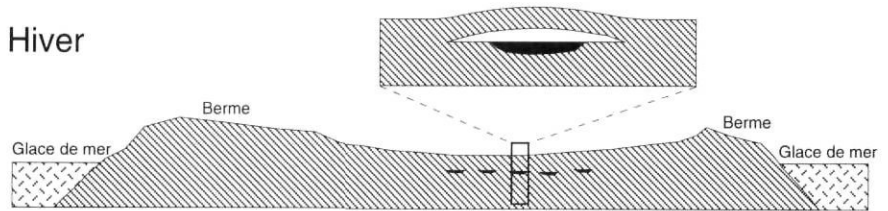
FIGURE 10. Séquence schématique de la formation et de la dégradation d'une butte cryogène saisonnière sur une plage arctique.

Idealized sequence of events leading to the formation and degradation of an arctic beach seasonal frost mound.

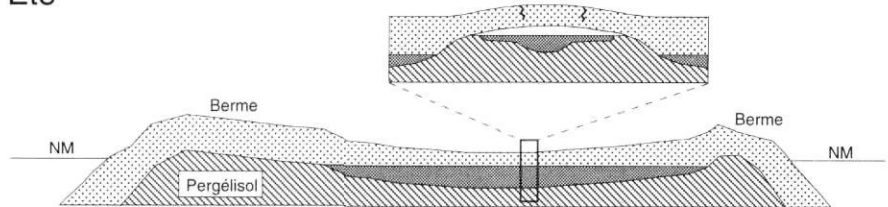
A) Automne: engel de la flèche



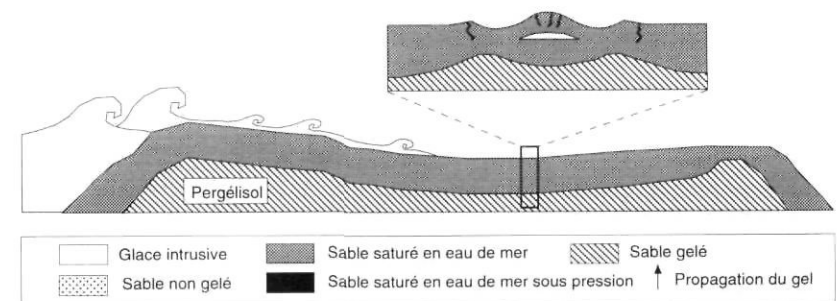
B) Hiver



C) Été



D) Fin de l'été: débordement de tempête



2) Un seul débordement de tempête semble avoir eu lieu entre la mi-août et la mi-septembre ; les débordements ultérieurs sont survenus après le début du gel ;

3) Le total des précipitations neigeuses enregistré avant le 1^{er} octobre 1992 était le double de celles observées à la même date en 1990 et 1991.

Il semble donc d'une part que l'apport en eau de mer dans la pseudo-dépression ait été limité du fait qu'il n'y ait eu qu'un seul débordement de tempête avant la période d'engel. L'engel s'étant produit précocement (mi-septembre), il a limité l'influence des débordements de tempête de la fin septembre. D'autre part, les précipitations neigeuses importantes et précoces sont susceptibles d'avoir ralenti la propagation du gel. Il est donc probable que le développement des buttes en 1992 ait été inhibé en raison de la faible quantité d'eau de mer dans la pseudo-dépression et du ralentissement de l'onde de gel. Les quelques buttes observées se sont développées dans la partie distale de la

flèche est de la pointe Atkinson, là où la flèche est moins élevée et où les débordements de tempête de moindre importance suffisent à l'inonder.

LE CYCLE ANNUEL DES BUTTES CRYOGÈNES SAISONNIÈRES

La reconstitution du cycle annuel des buttes cryogènes saisonnières a été élaborée à partir de levés topographiques, de mesures de la profondeur du mollisol et des données météorologiques (fig. 10). La séquence débute lors de l'engel. La progression des fronts de gel en provenance du pergélisol et de la surface emprisonne le sable saturé d'eau salée situé dans le centre déprimé de l'île ou de la flèche et accroît la pression hydrostatique (fig. 10A). Des lentilles de glace intrusive se forment et soulèvent le sable sus-jacent. Les fortes pressions provoquent par endroits l'extrusion d'eau salée vers la surface. L'eau éjectée forme des coulées de sable et des dépôts de sels. Ceux-ci

portent à croire que la salinité de l'eau contenue dans les interstices du sable doit être très forte et qu'une cellule de sable non gelé subsiste sous la lentille pendant l'hiver (fig. 10B). La salinité élevée abaisse le point de congélation et limite probablement la croissance de la lentille de glace. Après la fonte des neiges, le sable de surface fond jusqu'à une profondeur de 1 à 1,6 m (fig. 10C). Le sable situé sous la lentille de glace met plus de temps à fondre. Au cours de l'été, des crevasses apparaissent d'abord à la surface des buttes, puis il y a effondrement en périphérie. Enfin, les débordements de tempête de la fin de l'été et de l'automne aplanissent les buttes et entraînent la fonte complète de la lentille de glace (fig. 10D). Les débordements érigent la berme de tempête mais aplanissent le reste de la flèche, y compris la berme sur le rivage de la lagune. La dépression du centre de la flèche disparaît, mais les pentes très faibles (moins de 0,5 %) et le profil concave du plafond du pergélisol limitent l'écoulement de l'eau de mer contenu dans le sable au centre de la flèche. Une berme se reforme sur le rivage de la lagune dans les heures qui suivent la fin de chaque débordement de tempête, créant ainsi en surface une pseudo-dépression au centre de la flèche. Les débordements, s'ils ont été suffisamment fréquents dans les semaines précédant la période d'engel, maintiennent le sable saturé d'eau de mer dans le centre déprimé des flèches et des îles barrières et créent ainsi des conditions favorables à la formation de buttes cryogènes saisonnières au cours de la période d'engel.

DISCUSSION

Les buttes cryogènes saisonnières des flèches et des îles barrières de l'Arctique répondent sensiblement aux mêmes critères de formation que les *frost blisters*. Van Everdingen (1978) mentionne trois conditions nécessaires à la formation de *frost blisters* : un apport permanent d'eau hypodermique à basse température ; la présence d'un substrat peu perméable à proximité de la surface (tel qu'un pergélisol) ; et un long hiver avec des températures moyennes journalières sous le point de congélation.

Les deux dernières conditions se réalisent dans les îles barrières et sur les flèches sableuses de la péninsule de Tuktoyaktuk. Le premier facteur de formation, soit l'apport en eau, se matérialise toutefois de façon différente dans le cas des *frost blisters* et des buttes cryogènes saisonnières de plages. Les *frost blisters* sont alimentés de manière quasi continue par un écoulement hypodermique au cours de l'hiver, ce qui permet la formation d'une lentille de glace ayant entre 40 et 200 cm d'épaisseur (Pollard et van Everdingen, 1992). Le potentiel hydraulique élevé contribue au soulèvement de la butte de 1 à 3 m et à la formation en dôme de la lentille de glace. Les buttes cryogènes observées sur la côte de la péninsule de Tuktoyaktuk ont par contre un apport en eau limité une fois que l'engel a commencé, ce qui restreint le développement de la glace à quelques décimètres d'épaisseur. De plus, la pression hydrostatique ne permet pas la formation d'une chambre gazeuse ou liquide et le soulèvement qu'autorise le potentiel hydraulique élevé associé aux *frost blisters*. La glace con-

serve plutôt une forme circulaire et convexe dont la base demeure horizontale pendant toute sa croissance.

Une dernière distinction concerne le caractère saisonnier des buttes. Le volume de glace et la végétation qui recouvre les *frost blisters* isolent en partie la glace contre le réchauffement printanier et leur permettent parfois de persister plus d'une année. Les buttes cryogènes des plages arctiques ne sont pas recouvertes de végétation et l'action des débordements de tempête et les apports en eaux salées empêchent ces formes de persister plus d'une année.

Les buttes cryogènes des plages arctiques ont par ailleurs plus d'affinités avec certaines formes observées dans les marais intertidaux et les estrans vaseux de la Jamésie et de l'Hudsonie (Dionne, 1978 ; Fournier *et al.*, 1987 ; Allard *et al.*, 1992). Bien que la lithologie soit différente, les flèches sableuses et les vasières constituent de vastes étendues à pente faible où l'eau est susceptible d'être emprisonnée lors de l'engel. Les cuvettes thermokarstiques décrites par Dionne (1978) ont notamment le même diamètre que les buttes des accumulations littorales de la péninsule de Tuktoyaktuk et leur mode de formation pourrait être apparenté, bien qu'il n'ait pas été étudié en détail dans le cas des cuvettes thermokarstiques.

CONCLUSION

Les buttes cryogènes saisonnières de plages arctiques comportent quelques spécificités qui les distinguent des formes ayant été décrites précédemment :

- 1) Elles ne se forment que sur les flèches sableuses et les îles barrières dont la largeur excède 250 m et où les pentes sont inférieures à 0,5 %. Elles se forment dans une pseudo-dépression centrale qui retient captive l'eau de mer provenant des débordements de tempête.
- 2) Elles se forment en système fermé, par la croissance de glace intrusive provoquée par l'augmentation de la pression hydrostatique lors de l'engel dans le centre déprimé des accumulations littorales.
- 3) Les buttes ont un diamètre n'excédant pas 15 m et une hauteur maximale de 25 cm. Le développement de la lentille de glace est limité par la salinité de l'eau de mer et par l'absence d'apport d'eau au cours de l'hiver.
- 4) Les buttes sont des formes saisonnières ; elles ne peuvent subsister plus d'une année en raison des remaniements que subissent les accumulations littorales lors des débordements de tempête et de l'absence de végétation.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié de l'appui du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (Bourse de 1^{er} cycle à S. Campeau et subvention pour dépenses courantes à A. Héquette) et du Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche du Québec. L'organisation matérielle a été assurée par l'Étude du plateau continental polaire (Énergie, Mines et Ressources, Canada). Les auteurs remercient W.H. Pollard (McGill University,

Montréal) pour les photographies des lames minces des échantillons de glace et pour ses judicieux conseils. Les remarques constructives de M.-H. Ruz ont été très appréciées, ainsi que celles des lecteurs critiques, M^{me} Brigitte Van Vliet-Lanoë et M. Albert Pissart, et de la rédaction.

RÉFÉRENCES

- Academia Sinica, 1975. Permafrost. Research Institute of Glaciology, Cryopedology and Desert Research, Lanchou, China, National Research Council of Canada, Canada Institute for Scientific and Technical Information, Technical Translation 2006, 1981.
- Åkerman, J., 1987. Periglacial forms of Svalbard : A review, p. 9-25. *In* J. Boardman, éd., Periglacial processes and landform in Britain and Ireland. Cambridge University Press.
- Åkerman, H.J. et Malmström, B., 1986. Permafrost mounds in the Abisko area, Northern Sweden. *Geografiska Annaler*, 68A : 155-165.
- Allard, M., Fortier, R. et Seguin, M.K., 1992. The thermal regime of intertidal permafrost, George River estuary, Ungava Bay, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29 : 249-259.
- Brown, J., Nelson, B., Brockett, B., Outcalt, S.I. et Everett, K.R., 1983. Observations on ice-cored mounds at Sukapak Mountain, south central Brooks Range, Alaska, p. 91-96. *In* Proceedings Fourth International Conference on Permafrost. National Academy Press, Washington.
- Dijkmans, J.W.A., 1988. Seasonal frost mounds in an eolian sand sheet near Søndre Strømfjord, W. Greenland, p. 728-733. *In* Proceedings Fifth International Conference on Permafrost, Vol. 1. Tapir Publisher, Trondheim.
- Dionne, J.-C., 1978. Le glacier en Jamésie et Hudsonie, Québec subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 32 : 3-70.
- Fissel, D.B. et Birch, J.R., 1984. Sediment Transport in the Canadian Beaufort Sea. Rapport non publié par Arctic Sciences, Sidney, B.C. pour la Commission géologique du Canada, 165 p.
- Forbes, D.L. et Frobel, D., 1985. Coastal erosion and sedimentation in the Canadian Beaufort Sea. Geological Survey of Canada, Current Research Paper 85-1B : 69-80.
- Fournier, A., Allard, M. et Seguin, M.K., 1987. Typologie morpho-génétique des marelles du marais littoral de la baie de Kangisualujuaq, estuaire du George, Québec nordique. *Géographie physique et Quaternaire*, 41 : 47-64.
- Frederking, R.M.W., 1979. Rupture of an ice mound near Cape Dorset, N.W.T. *Canadian Geotechnical Journal*, 16 : 604-609.
- French, H.M., 1971. Ice cored mounds and patterned ground, southern Banks Island, western Canadian Arctic. *Geografiska Annaler*, 53A : 32-38.
- French, H.M. et Gilbert, R., 1982. Periglacial phenomena near Churchill, Manitoba. *Naturaliste canadien*, 109 : 433-444.
- Froehlich, W. et Slupik, J., 1978. Frost mounds as indicators of water transmission zones in the active of permafrost during the winter season (Khangay Mts., Mongolia), p. 189-193. *In* Proceedings Third International Conference on Permafrost, Vol. 1. National Research Council of Canada, Ottawa.
- Harper, J.R. et Penland, S., 1982. Beaufort Sea sediment dynamics. Rapport non publié par Woodward-Clyde Consultants, Victoria, pour la Commission géologique du Canada, 125 p.
- Harper, J.R., Henry, R.F. et Stewart, G.G., 1988. Maximum storm surge elevations in the Tuktoyaktuk region of the Canadian Beaufort Sea. *Arctic* 41 : 48-52.
- Heginbottom, J.A., 1984. The mapping of permafrost. *Canadian Geographer*, 28 : 78-83.
- Héquette, A. et Ruz, M.-H., 1991. Spit and barrier island migration in the southeastern Canadian Beaufort Sea. *Journal of Coastal Research*, 7 : 677-698.
- Leffingwell, E. de K., 1919. The Canning River region, northern Alaska. U.S. Geological Survey, Professional Paper 109.
- Mackay, J.R., 1973. The growth of pingos, Western Arctic Coast, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 10 : 979-1004.
- 1975. Freezing processes at the bottom of permafrost, Tuktoyaktuk Peninsula, District of Mackenzie. Geological Survey of Canada Paper, 75-1A : 471-474.
- 1977. Pulsating pingos, Tuktoyaktuk Peninsula, N.W.T. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14 : 209-222.
- Malmström, B., 1987. Frost mounds in the marginal zone of permafrost, northern Sweden, p. 191-201. *In* M. Pécsi et H.M. French, éd., Loess and Periglacial phenomena. Symposium of the INQUA Commission on loess, Lithology, Genesis and Geotechnic Definitions and IGU Commission for Periglacial Studies : Field and Laboratory Experimentation. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- McCann, S.B. et Taylor, R.B., 1975. Beach freezeup sequence at Radstock Bay, Devon Island, Arctic Canada. *Arctic and Alpine Research*, 7 : 379-386.
- Muller, S.W., 1945. Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems. U.S. Army, Military Intelligence Division, Washington (Special Report. Strategic Engineering Study, No. 62).
- Niewiarowski, W. et Sinkiewicz, M., 1988. Frost mounds in Kaffiyyra and Hermanseniya, NW Spitsbergen, and their origin, p. 824-829. *In* Proceedings Fifth International Conference on Permafrost, Vol. 1. Tapir Publisher, Trondheim.
- Pollard, W.H., 1988. Seasonal frost mounds, p. 201-229. *In* M.J. Clark, éd., Advances in Periglacial Geomorphology. John Wiley and Sons, Chichester.
- 1991. A high arctic occurrence of seasonal frost mounds, p. 263-275. *In* T.D. Prowse et C.S.L. Ommanney, éd., Northern Hydrology : Selected Perspectives. Proceedings of the Northern Hydrology Symposium, Saskatoon.
- Pollard, W.H. et French, H.M., 1983. Seasonal frost mound occurrence, North Fork Pass, Ogilvie Mountains, Northern Yukon, Canada, p. 1000-1004. *In* Proceedings Fourth International Conference on Permafrost. National Academy Press, Washington.
- 1984. The groundwater hydraulics of seasonal frost mounds, North Fork Pass, Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21 : 1073-1081.
- 1985. Internal structure and ice crystallography of seasonal frost mounds. *Journal of Glaciology*, 31 : 157-162.
- Pollard, W.H. et Van Everdingen, R.O., 1992. Formation of seasonal ice bodies. *In* J.C. Dixon et A.D. Abrahams, éd., Proceedings 22nd Binghamton Symposium in Geomorphology. John Wiley and Sons, Chichester.
- Reimnitz, E., Barnes, P.W. et Harper, J.R., 1990. A review of beach nourishment from ice transport of shoreface materials, Beaufort Sea, Alaska. *Journal of Coastal Research*, 6 : 439-470.
- Ruz, M.-H., Héquette, A. et Hill, P.R., 1992. A model of coastal evolution in a transgressed thermokarst topography, Canadian Beaufort Sea. *Marine Geology*, 106 : 251-278.
- Taylor, R.B., 1980. Beach Thaw Depth and the Effect of Ice-Bonded Sediment on Beach Stability, Canadian Arctic Islands, p. 103-121. *In* Proceedings of the Canadian Coastal Conference. National Research Council Canada, Ottawa.
- van Everdingen, R.O., 1978. Frost mounds at Bear Rock, near Fort Norman, Northwest Territories, 1975-1976. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15 : 263-276.
- 1982. Frost Blisters at Bear Rock Spring Area near Fort Norman, N.W.T. Arctic, 35 : 243-265.
- van Everdingen, R.O. et Banner, J.A., 1979. Use of long-term automatic time-lapse photography to measure the growth of frost blisters. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16 : 1632-1635.